



USO DE LA METODOLOGÍA AHP (ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS) PARA LA ZONIFICACIÓN DE RIESGOS DE LA VARIANTE LURUACO – ARROYO DE PIEDRA EN LOS MUNICIPIOS DE LURUACO Y REPELÓN DEL DEPARTAMENTO DEL ATLANTICO

USE OF AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS) METHODOLOGY FOR RISK ZONING OF THE LURUACO - ARROYO DE PIEDRA VARIANT IN LURUACO AND REPELON MUNICIPALITIES OF ATLANTICO DEPARTMENT

Diana Paola Almario Guio
Código 3101538
Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Director:
Ing. Freddy León Reyes M.Ed

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
JUNIO DE 2021
BOGOTÁ-COLOMBIA**

USO DE LA METODOLOGIA AHP (ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS) PARA LA ZONIFICACION DE RIESGOS DE LA VARIANTE LURUACO – ARROYO DE PIEDRA EN LOS MUNICIPIOS DE LURUACO Y REPELON DEL DEPARTAMENTO DEL ATLANTICO

USE OF AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS) METHODOLOGY FOR RISK ZONING OF THE LURUACO - ARROYO DE PIEDRA VARIANT IN LURUACO AND REPELON MUNICIPALITIES OF ATLANTICO DEPARTMENT

Freddy León Reyes

Magister en Educación, Especialista en Docencia Universitaria, Ingeniero de Sistemas con énfasis en software.

Docente Facultad de Ingeniería.
Universidad Militar Nueva Granada.

Bogotá, Colombia

freddy.leon@unimilitar.edu.co

RESUMEN

La presente investigación explora la aplicación de los SIG en la definición y zonificación de riesgos por amenazas tanto naturales como operativas, tomando como caso de estudio la proyección de una variante para el gasoducto Zona Bananera en el departamento del Atlántico. Como alcance metodológico se aplica un análisis de procesos jerárquicos (AHP) para la jerarquización de las variables que actúan como factores condicionantes dentro de la definición de amenazas; posteriormente se definen las condiciones o elementos expuestos que representan algún grado de vulnerabilidad desde el medio hacia el proyecto y en el sentido contrario. Con base en una ponderación coherente al comportamiento del medio y del proyecto, fue posible obtener la zonificación de los riesgos externos e internos para la variante de estudio. Concluyendo que la zonificación de riesgos representa un factor o criterio importante dentro de las etapas de ingeniería para proyectos futuros o incluso actuales.

Palabras Clave: AHP, Amenaza por remoción en masa, amenaza por inundación, amenaza por incendio forestal, amenaza operativa, elementos expuestos, gasoducto, vulnerabilidad, zonificación del riesgo.

ABSTRACT

This research explores the application of GIS in the definition and zoning of risks due to both natural and operational hazards, taking as a case study the projection of a

variant for the Zona Bananera gas pipeline in Atlántico department. As a methodological scope, an Analytic Hierarchy Process (AHP) is applied to rank the variables that act as conditioning factors in definition of hazards; subsequently, exposed conditions or elements that represent some degree of vulnerability are defined, from the environment to the project and in the opposite direction. Based on a consistent weighting of the environmental behavior and the project, it was possible to get the external and internal risks zoning for the variant under study. For conclude, risk zoning represents an important factor or standard in the engineering for future or even current projects.

Keywords: AHP, mass removal hazard, flood hazard, forest fire hazard, operational hazard, exposed elements, pipeline, vulnerability, risk zoning.

INTRODUCCIÓN

El gas natural es uno de los recursos energéticos más demandados por tanto es indispensable garantizar su suministro ininterrumpido; debido a que fallas en el sistema afectarían diversos sectores de la sociedad, como lo son: el sector residencial, el industrial, el de transporte vehicular e inclusive el sector de generación de energía eléctrica (en situaciones de reducción de capacidad de las centrales hidroeléctricas). Una de las formas para asegurar este suministro, adicional a las buenas prácticas de extracción y la regulación de esta, es la forma en que se transporta ya sea a través de barcos metaneros, camiones y/o tuberías (Becerra & Rodriguez, 2017).

La industria de los hidrocarburos tuvo su origen en Colombia a principios del siglo XX con los desarrollos de explotación petrolera asociada a la concesión De Mares que en 1907 generó la primera producción de crudo en el país; desde el inicio de las operaciones petroleras y durante un gran periodo de tiempo, el gas natural de los pozos productores del país fue considerado un producto sin valor que obstaculizaba las actividades de las empresas del sector, no siendo sino hacia finales de los años 50s del siglo pasado cuando adquirió sentido el uso y aplicación del gas obtenido en los campos de producción, empezando a ser aprovechado para procesos industriales en los grandes centros de demanda en Colombia, lo que requirió la construcción de gasoductos de transporte del combustible que conectaron las fuentes de producción con las ciudades consumidoras (Delvasto, 2017).

En los últimos años, los proyectos lineales se han visto condicionados por diferentes factores externos que deben ser considerados dentro de la normatividad ambiental vigente, teniendo como objeto suministrar la información para evaluar y comparar las diferentes opciones que presente el peticionario, bajo las cuales sea posible desarrollar un proyecto, obra o actividad. Las diferentes opciones deberán tener en cuenta el entorno geográfico y sus características ambientales y sociales, análisis comparativo de los efectos y riesgos inherentes a la obra o actividad, y de las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas (MAVDT, 2010).

Colombia está constituida por una amplia diversidad geológica, geomorfológica, hidrológica y climática, la cual se expresa en un conjunto de fenómenos que

representan una potencial amenaza para el desarrollo social y económico del país. Anudado a lo anterior, el crecimiento poblacional y las deficiencias en los procesos de planificación y ordenamiento urbano y regional, así como la falta de capacidad para cubrir las necesidades de vivienda, generan un incremento de asentamiento en zonas no aptas para el desarrollo y expansión de la cobertura urbana, así como la creación de barrios informales asociados a infraestructura deficitaria (Banco Mundial , 2012).

Dentro de los grandes proyectos lineales se encuentran los gasoductos, encontrando en la actualidad varias las empresas que tienen concesiones frente a los gasoductos, siendo una de estas la Transportadora de Metano ESP.S.A. – TRANSMETANO, empresa que ejerce propiedad y operación del gasoducto Zona Bananera. Siendo las empresas transportadoras responsables en la definición de riesgos asociados a los gasoductos, razón por la cual es importante contar con los conocimientos e instrumentos técnicos que contribuyan al funcionamiento de la red, considerando dentro de este último, las amenazas a las cuales se encuentra expuesto el proyecto, así como los riesgos derivados.

Dentro de los antecedentes en Colombia donde se han presentado afectaciones de gasoductos por amenazas naturales se registran algunos eventos de este tipo que han ocasionado fallas en otros gasoductos del país, como lo son: el deslizamiento ocurrido en junio de 2018 en un sector del gasoducto que moviliza gas desde los Llanos Orientales al interior del país (Boyacá y Cundinamarca), dicho suceso provocó la explosión de un tubo de 20 pulgadas, lo cual generó la suspensión del suministro de gas y una serie de afectaciones ambientales y sociales, al igual que el deslizamiento que rompió el gasoducto Mariquita – Cali en diciembre de 2011 dejando al suroccidente del país sin abastecimiento de gas domiciliario y vehicular por varios días. Ambos operados por la empresa Transportadora de Gas Internacional – TGI (Barrientos & Valderrama, 2020).

Desde el punto de vista constructivo y energético, las amenazas naturales representan un factor que debe ser identificado y posteriormente sometido a medidas de prevención, mitigación o control, ya que la ocurrencia de eventos de este tipo representa un alto costo tanto económico como social y ambiental; en este contexto se toma como caso de estudio “La variante Luruaco - Arroyo de piedra para el gasoducto Zona Bananera”, que surge como una alternativa para el manejo y transporte de gas, evitando las amenazas asociadas a la cercanía del proyecto lineal con el centro poblado del municipio de Luruaco.

Al ser un proyecto lineal se encuentra expuesto a varios tipos y niveles de amenaza, al ubicarse dentro de un área donde se presentan varias coberturas naturales y actividades económicas que limitan o restringen el trazado de la variante alternativa, de manera que se plantea el uso de sistemas de información geográfica para la determinación de los riesgos asociados a esta variante, identificando las amenazas tanto internas como externas.

La zonificación de amenazas y riesgos es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, especialmente en las primeras etapas de planeación de un proyecto. La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la calificación

de cada una de estas áreas, de acuerdo al grado real o potencial de amenaza o de riesgo (Suarez, 1998).

Los métodos utilizados para la zonificación y delimitación de susceptibilidad y amenaza pueden clasificarse de acuerdo con el propósito de la zonificación, el nivel de la zonificación y la escala de zonificación. La selección de método de zonificación dependerá de otros factores como la disponibilidad, calidad y exactitud de los datos, la resolución de la zonificación, los resultados esperados, etc. Dicho lo anterior, los métodos pueden ser heurísticos, estadísticos, determinísticos, estocásticos, entre otros (Sarmiento, 2017).

Existe una clara diferencia entre la cartografía de los riesgos naturales y la de los riesgos tecnológicos. En el caso de los riesgos tecnológicos, sin embargo, la probabilidad de que un accidente ocurra y la magnitud del área alcanzada por sus consecuencias son cuestiones que responden a factores muy complejos relacionados con la naturaleza de las sustancias implicadas en la actividad y la extraordinaria variedad de los procesos a los que son sometidas (Bosque, y otros, 2004).

Otra cuestión a tener en cuenta cuando se elabora cartografía de riesgos tecnológicos es la de la distinción entre impacto (inherente al funcionamiento normal de las tecnologías) y riesgos (probabilidad de que se den accidentes, fallos en el funcionamiento de las mismas). En este segundo caso, no suelen existir evidencias empíricas sobre los efectos en el territorio de episodios accidentales que, afortunadamente, son muy infrecuentes (Bosque, y otros, 2004).

Dentro de los objetivos que se pretender abordar en el siguiente estudio se encuentran: 1. Aplicar la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) en la definición de criterios para la zonificación del riesgo. 2. La identificación de eventos amenazantes internos y externos y su zonificación a lo largo del trazado de la variante. 3. La valoración y zonificación de los riesgos internos y externos de la variante proyectada.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de generar la zonificación del riesgo de la variante Luruaco – Arroyo de piedra del gasoducto Zona Bananera, se llevará a cabo el desarrollo de un modelo empleando la metodología AHP (Análisis de procesos jerárquicos) aplicando un enfoque heurístico y el análisis multicriterio para generar la zonificación del riesgo dentro del área de influencia de la variante Luruaco-Arroyo de Piedra.

AHP es un método de análisis cualitativo o cuantitativo para la toma de decisiones. Se basa en la descomposición de los elementos relacionados con la toma de decisiones en niveles objetivos, de criterios y de atributos. Es un método de análisis de decisión de peso jerárquico que fue propuesto por el investigador operacional estadounidense Saaty en 1971.

La Figura 1 presenta un esquema genérico o árbol de jerarquías, mediante el cual se pueden realizar las comparaciones de criterios con criterios, subcriterios con

subcriterios y alternativas con alternativas. En las comparaciones se toman por pares, evaluando su relación, es decir analizando la importancia relativa de uno sobre otro con relación al objetivo propuesto. Las sucesivas evaluaciones se representan mediante matrices que enfrentan los criterios, subcriterios y alternativas en filas y columnas.

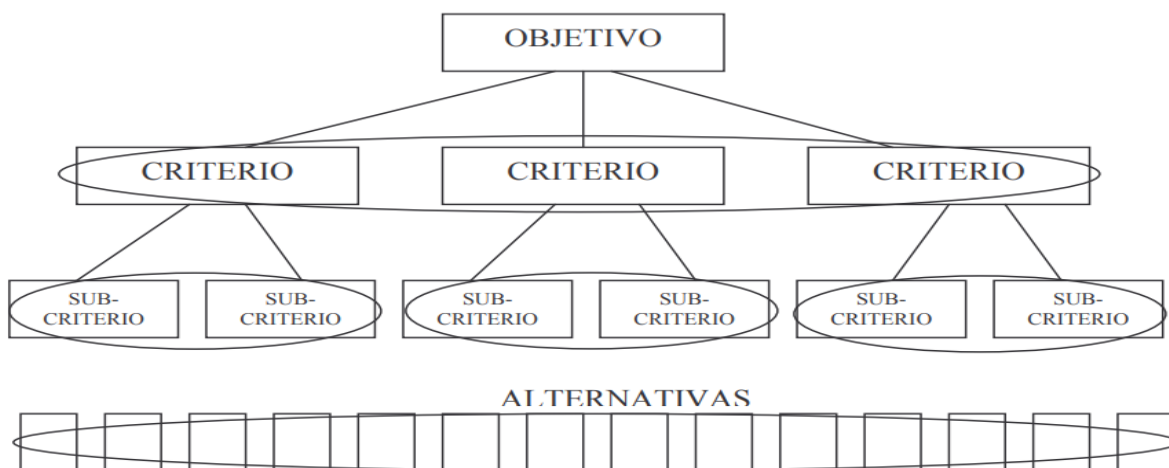


Figura 1 Estructura de la jerarquía AHP
Fuente: (ALVAREZ, ARQUERO, & MARTÍNEZ, 2000)

La escala de valores para la asignación de ponderaciones es una escala numérica de 17 valores o jerarquías, que va de un valor mínimo de 1/9 (de menos importancia) a 9 (el más importante). En la diagonal de la matriz solo se obtendrán valores de 1, así como en los casos en los que dos factores distintos tengan el mismo valor de importancia. La Figura 2, representa la distribución de las ponderaciones.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----|-------------|-----|---------------|-----|-------------|-----|-------|----------------|-------------|----|---------------|----|-------------|----|----------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | |
| 1/9 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Extremadamente | | Fuertemente | | Moderadamente | | Ligeramente | | Igual | | Ligeramente | | Moderadamente | | Fuertemente | | Extremadamente | |
| MENOS IMPORTANTE | | | | | | | | | MÁS IMPORTANTE | | | | | | | | |

Figura 2 Escala de importancia relativa con la construcción de la matriz de comparación por pares de decisión.
Fuente: (Sarmiento, 2017)

Para la definición de las variables que se pretende priorizar dentro de la estructuración del modelo para la zonificación del riesgo a lo largo de la variante Luruaco, se lleva a cabo una búsqueda de información cartográfica consultando diferentes portales de datos abiertos dentro del territorio nacional y que provienen de fuentes oficiales. Esta

información es complementada con información primaria que se tiene del área de estudio.

Teniendo conocimiento de la localización del área de interés, se realiza el proceso que consiste en verificar el sistema de coordenadas de la información y realizar las respectivas transformaciones para que toda la información esté en el sistema de referencia Origen Único para Colombia.

Para la definición del área de interés para el estudio se tuvo en cuenta lo definido dentro de la metodología de la norma NTC 3728, en la que se establece un buffer de 200 metros a lo largo del trazado del proyecto. El desarrollo del análisis espacial se emplea el software de ArcGIS, recortando las capas tomando como referencia el área de interés a lo largo del trazado de la variante Luruaco – Arroyo de piedra.

Las Tabla 1 presenta las fuentes de información que fueron empleadas para el estudio se describen a continuación, siendo la información mínima requerida para la caracterización del área de estudio.

Tabla 1 Fuentes de información para el estudio

| TIPO DE INFORMACIÓN | REPRESENTACIÓN | CARACTERIZACIÓN | FUENTE |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--|
| Cartografía Básica | Red de drenaje | Hidrografía | Base Cartográfica IGAC |
| | División político-administrativa | Municipios | |
| | Centros poblados | Luruaco Arroyo de Piedra | |
| | Red vial | Red vial | |
| Cartografía Temática | Construcciones | Construcciones | Ortofotografía |
| | Pendiente | Pendiente | DEM |
| | Geología | Unidades geológicas | Planchas del Servicio Geológico Colombiano - SGC |
| | Geomorfología | Unidades geomorfológicas | |
| | Cobertura Vegetal | NVDI | Imagen Sentinel 2 T18PVS_20210116T153621 |
| | Proyectos Lineales | Tubería | SIAC |
| Meteorología | Precipitación | Polígonos de Thiessen | Estaciones del IDEAM |
| | Temperatura | Temperatura | SIAC – Promedio anual multianual 1971_2000. |

Contando con la información existente y los mapas temáticos, se aplica la metodología ya mencionada, jerarquizando los criterios y combinándolo con las potencialidades de un SIG.

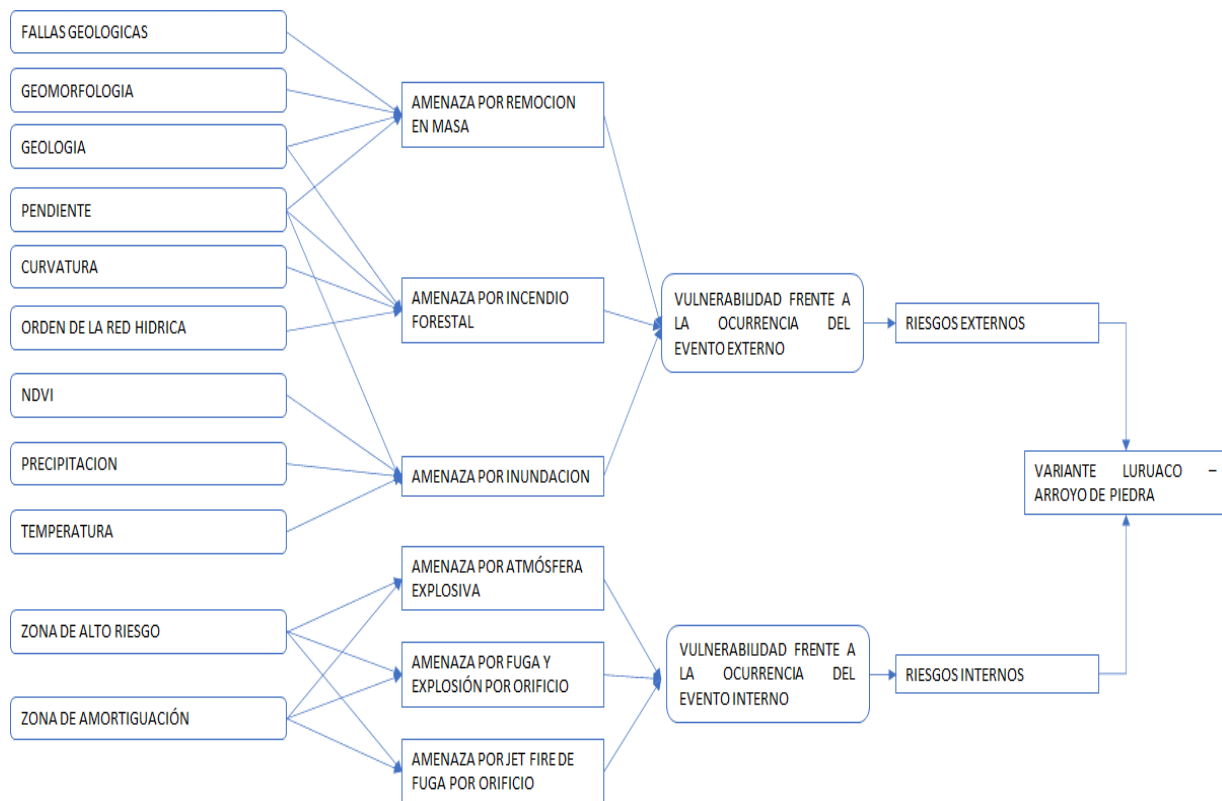


Figura 3 Modelo analítico para la definición de riesgos.

Se procede a establecer la jerarquización de las variables y dar los pesos ponderados a cada una de ellas. Debido a que se pueden cometer errores al momento de hacer la ponderación de cada criterio por equivocaciones del grupo de expertos o del experto, la tasa de consistencia CR se computa para asegurar la coherencia de la comparación de pares y de los pesos otorgados por cada factor. Si el CR es menor de 0,10 (10%), la comparación de los pares tiene una buena consistencia, los pesos son válidos y son aceptados para la evaluación multicriterio; en caso contrario, la matriz no presenta consistencia y, por ende, los valores deben ser modificados (Sarmiento, 2017).

En la Tabla 2 se presenta la matriz de comparación y los pesos obtenidos de la evaluación con la técnica multicriterio aplicada para la amenaza por remoción en masa en el área de estudio. El nivel de inconsistencia es de 0.0514, aceptable por la metodología AHP.

Tabla 2 Pesos de las variables para definición de amenaza por remoción en masa

| Variables | | V1 | V2 | V3 | V4 |
|---------------|----|------|------|------|------|
| Pendiente | V1 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| Geología | V2 | 0.50 | 1.00 | 2.00 | 3.00 |
| Geomorfología | V3 | 0.50 | 0.50 | 1.00 | 2.00 |

| Variables | | V1 | V2 | V3 | V4 |
|-------------------|----|------|------|------|------|
| Fallas geológicas | V4 | 0.50 | 0.33 | 0.50 | 1.00 |

| Variables para amenaza por remoción en masa | | PESOS |
|---|-------------------|-------|
| V1 | Pendiente | 0.38 |
| V2 | Geología | 0.30 |
| V3 | Geomorfología | 0.19 |
| V4 | Fallas geológicas | 0.12 |
| | | 1 |

En la Tabla 3 se presenta la matriz de comparación y los pesos obtenidos de la evaluación con la técnica multicriterio aplicada para la amenaza por inundación en el área de estudio. El nivel de inconsistencia es de (-0.0290), aceptable por la metodología AHP.

Tabla 3 Pesos de las variables para definición de amenaza por inundación

| Variables | | V1 | V2 | V3 | V4 |
|-------------------------|----|------|------|------|------|
| Pendiente | V1 | 1.00 | 0.33 | 0.33 | 2.00 |
| Curvatura | V2 | 3.00 | 1.00 | 0.25 | 2.00 |
| Orden de la red hídrica | V3 | 3.00 | 0.50 | 1.00 | 3.00 |
| Depósitos aluviales | V4 | 0.50 | 0.50 | 0.33 | 1.00 |

| Variables para amenaza por inundación | | PESOS |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|
| V1 | Pendiente | 0.18 |
| V2 | Curvatura | 0.29 |
| V3 | Orden de la red hídrica | 0.38 |
| V4 | Depósitos aluviales | 0.14 |
| | | 1 |

En la Tabla 4 se presenta la matriz de comparación y los pesos obtenidos de la evaluación con la técnica multicriterio aplicada para la amenaza por incendio forestal en el área de estudio. El nivel de inconsistencia es de 0.0792, aceptable por la metodología AHP.

Tabla 4 Pesos de las variables para definición de amenaza por incendio forestal

| Variables | | V1 | V2 | V3 | V4 |
|------------------|----|------|------|------|------|
| NDVI | V1 | 1.00 | 5.00 | 5.00 | 4.00 |
| Pendiente | V2 | 0.20 | 1.00 | 2.00 | 3.00 |
| Precipitación | V3 | 0.20 | 0.50 | 1.00 | 2.00 |
| Temperatura | V4 | 0.25 | 0.33 | 0.50 | 1.00 |

| Variables para amenaza por incendio forestal | | PESOS |
|---|---------------|--------------|
| V1 | NDVI | 0.59 |
| V2 | Pendiente | 0.20 |
| V3 | Precipitación | 0.13 |
| V4 | Temperatura | 0.08 |
| | | 1 |

Para la zonificación del riesgo interno, se procede a emplear los radios de afectación que se pueden presentar a lo largo de la variante del gasoducto teniendo en cuenta que los radios de afectación indican las zonas de daño en caso de accidente por incendio y/o explosión asociada al transporte de gas. Estos radios de afectación se definen con base en simulaciones a través de software especializado. Como el objeto del presente estudio no es la definición de estos radios, se tomará como fuente el análisis de riesgo para una tubería de seis (6) pulgadas, desarrollado por (CENAGAS).

En la Tabla 5 se definen los rangos de afectación para un ducto de 6 pulgadas, bajo los factores de diseño contemplados en el caso estudio. Se resalta que estos radios de afectación varían de acuerdo con los factores de diseño definitivos para los gasoductos. Se presentan los eventos amenazantes y los radios asociados a las zonas de amortiguación (ZA) y zona de alto riesgo (ZAR).

Tabla 5 Radios de afectación para cada evento amenazante operativo definido para el estudio.

| COD | EVENTO AMENAZANTE - AMENAZA OPERATIVA | metros (m) | |
|--------------|---|-------------------|------------|
| | | ZA | ZAR |
| AT_EX | Formación de atmósfera explosiva a causa de fuga generada por ruptura en válvula bridada de 6" de la City Gate. | 243.34 | 142.98 |
| FU_EX | Fuga y explosión por orificio correspondiente al 20% del diámetro nominal del ducto | 370.97 | 218.24 |
| JET-F | Jet Fire de fuga por orificio correspondiente al 20% del diámetro nominal del ducto. | 28.61 | 15.56 |

Fuente: Modificado de (CENAGAS).

Teniendo en cuenta que, los eventos amenazantes operativos previamente presentados, se pueden materializar de manera independiente, sin la necesidad de que se presenta una relación, se decide no jerarquizarlos aplicando la metodología de

AHP y manejar cada evento de manera independiente como una amenaza operativa, con el objeto de establecer riesgos internos asociados a la operación del gasoducto.

Una vez definidos los pesos, se procede a realizar análisis espacial empleando los mapas temáticos generados y otros, producto del procesamiento espacial. Considerando que lo que se busca es desarrollar una zonificación del riesgo, el procesamiento de análisis espacial se genera basado en datos raster, mediante álgebra de mapas, de manera que se procede a valorar cada amenaza.

1.1. Amenaza por remoción en masa

Se califican las variables: Pendiente, Geología, Geomorfología, Fallas geológicas; las cuales han recibido un valor teniendo en cuenta la literatura y el criterio técnico de quien elabora este estudio.

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyo valor se expresa en grados de 0 a 90. La pendiente es el principal factor geométrico a tener en cuenta en análisis de estabilidad y puede obtenerse como una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Tabla 6 Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa.

| INCLINACIÓN (°) | PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO | VALOR |
|----------------------------|---|--------------|
| 0-2 | Plano a casi plano. No hay denudación apreciable. | 1 |
| 2-4 | Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluxión) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos. | 2 |
| 4-8 | Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos. | 3 |
| 8-16 | Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluxión periglacial, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos. | 4 |
| 16-35 | Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos. | 5 |

| INCLINACIÓN (°) | PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO | VALOR |
|---|---|--------------|
| 35-55 | Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor. | 6 |
| > 55 | Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente “denudación de escarpe”; susceptible a rodamiento de rocas. | 7 |
| Fuente: Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017) | | |

La calificación asignada a las unidades geológicas, dada su particularidad para cada territorio, se ha definido tomando como referente información del Servicio Geológico Colombiano –SGC, que define la fábrica y/o estructura de las unidades geológicas, como la variable de mayor peso en cuanto a calidad de rocas.

Tabla 7 Calificación de Textura/Fábrica de las rocas de las unidades geológicas en el área de interés.

| TEXTURA/ FÁBRICA | PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO | VALOR | UNIDAD GEOLÓGICA |
|----------------------------------|---|--------------|--|
| Cristalina Masiva | En rocas de cualquier origen (ígneo, metamórfico o sedimentario) cuyas partículas minerales están entrelazadas y con orientación aleatoria. Corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa según sean porosas o no lo sean. Ejemplos: granitos, basaltos, calizas, chert, cuarcitas y mármoles. | 1 | Formación Pendales (Pgp) Formación Arroyo de Piedra (Pga) |
| Cristalinas Bandeadas | En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional. Ejemplo: Neis. | 2 | Depósitos cuaternarios coluvioaluviales (Qal) |
| Clásticas Cementadas | En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea. Ejemplos: areniscas, conglomerados. | 3 | Formación San Cayetano (Pgsc) |

| TEXTURA/ FÁBRICA | PROCESOS CONDICIONES DEL TERRENO | Y VALOR | UNIDAD GEOLÓGICA |
|---|---|---------|---|
| Clásticas Consolidadas | En estas rocas se presenta comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenética. Ejemplos: arcillolitas, lodolitas, shales. | 4 | Formación Hibachaco (Ngh) Formación Las Perdices (PgNgp) |
| Cristalina Foliada y Rocas de falla | En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación. Ejemplos: Pizarras, filitas, esquistos, milonitas. | 5 | |

Fuente: Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Los movimientos en masa como expresión de los procesos exógenos, pueden prevalecer como eventos con pérdida o ganancia de material dependiendo el sitio y la geoforma que determinen, y son indiferentes del ambiente de formación y del lugar de ocurrencia. De esta manera se califican las unidades geomorfológicas del área de estudio con base en lo descrito por (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

Tabla 8 Calificación de unidades geomorfológicas en el área de estudio

| ORIGEN | VALOR | UNIDAD GEOMORFOLÓGICA |
|--|-------|--|
| LACUSTRE (erosión Lagunar y depositación) | 1 | Embalses Laguna |
| FLUVIAL Y DELTAICO Erosión y Sedimentación. | 2 | Plano o llanura de inundación Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión |
| KÁRSTICO Solución y re-depositación. | 3 | Lomeríos disectados |
| MORFOESTRUCTURAL Procesos endógenos (Neotectonismo plegamientos, fallamientos). | 4 | Espolón facetado bajo de longitud media Sierra anticlinal |
| DENUACIONAL Procesos exógenos (Meteorización, procesos denudativos). | 4 | Sierra y lomo de presión Cerro remanente o relicto |
| ANTROPOGENICO y/o BIOLÓGICO | 4 | Excavaciones |

Fuente: Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Teniendo en cuenta que una falla es una fractura planar a lo largo de la cual la roca se ha desplazado según una dirección que es generalmente paralela al plano de ruptura (puede ser horizontal, vertical u oblicua), como consecuencia de la aplicación de un estrés (Niemeyer, 1999). Se ha analizado esta variable empleando el método utilizado para calcular la densidad de fracturamiento, que es el algoritmo de Line Density de ArcGIS, el cual es expresado en m/Km². Este método calcula la densidad de las líneas en la vecindad de cada pixel, definida por un radio de búsqueda, el cual se dejó por defecto para el presente estudio.

1.2. Amenaza por inundación

Se califican las variables: Pendiente, curvatura, orden de red hídrica, depósitos aluviales; las cuales han recibido un valor teniendo en cuenta la literatura y el criterio técnico de quien elabora este estudio.

Para la definición de amenaza por inundación se toma como referencia lo propuesto por (CORNARE, 2012). Para la asignación de las distancias en los buffers relacionados con el orden de la red hídrica, se define que los drenajes presentes en el área de estudio corresponden a drenajes pequeños que se conectan a los cuerpos de agua lenticos existentes y cuya longitud no supera los 5 kilómetros, por lo cual se define un buffer de 50 metros.

| Tabla 9 Definición de buffer para orden de la red hídrica. | | |
|---|---|----------------------|
| ORDEN | TIPO DE AFLUENTE | TAMAÑO BUFFER |
| 0 | Nacimiento red hídrica, quebradas Pequeñas < 5 km | 50 m |
| 1 | Quebradas entre 5-10 km | 80 m |
| 2 | Quebradas Importantes | 150 m |
| 3 | Ríos Importantes Subcuencas | 250 m |
| 4 | Ríos Cuencas | 400 m |
| 5 | Embalses y Ciénagas | Sin buffer |

Fuente: Modificado de (CORNARE, 2012).

Para la definición de los depósitos aluviales se empleó la información consignada en las unidades geológicas del área de influencia del proyecto, ya que la zonificación de las inundaciones solo se restringe a estas zonas.

Para identificar las zonas inundables, se parte del concepto de que las zonas del cauce donde el flujo de agua aumenta su lámina y genera rebose, corresponde a áreas de bajo gradiente y de baja inclinación, por ello se tomó el mapa de pendientes existentes (Tabla 6) y se reclasificó teniendo como prelación las pendientes bajas.

Se toma como criterio la curvatura, ya que esta considera la convergencia o divergencia de una corriente, en este caso la convergencia (superficie cóncava)

presenta una mayor susceptibilidad a la generación de inundación, al representar una zona con mayor facilidad de acumulación de flujo, comparado con una geoforma convexa.

Tabla 10 Calificación de la curvatura en el área de influencia del proyecto

| CURVATURA | VALOR |
|-------------------------------|-------|
| (-1065,362427) – (-42,843161) | 5 |
| (-42,843161) - (-5,433919) | 4 |
| (-5,433919) - 31,975322 | 3 |
| 31,975322 - 805,099645 | 2 |
| 805,099645 - 2114,423096 | 1 |

1.3. Amenaza por Incendios forestales

Se califican las variables: Precipitación, NDVI, temperatura y pendiente; las cuales han recibido un valor teniendo en cuenta la literatura y el criterio técnico de quien elabora este estudio.

(Barrientos & Valderrama, 2020) propone la identificación de factores condicionantes a partir del NDVI, en la zona estudiada, asignando mayor restricción a aquellos sectores donde se presentan valores altos en el NDVI, ya que estos son asociados a presencia de alguna cobertura vegetal y valores menores a aquellas zonas donde el NDVI es igual o menor 0, pues representan zonas de suelo desnudo, nubes, cuerpos de agua e infraestructuras.

Tabla 11 Calificación de NVDI en el área de interés

| NDVI | VALOR |
|------------------------|-------|
| (-0,171710) - 0,046061 | 1 |
| 0,046061 - 0,124830 | 2 |
| 0,124830 - 0,185064 | 3 |
| 0,185064 - 0,245299 | 4 |
| 0,245299 - 0,419052 | 5 |

Para la definición de la precipitación se realiza una interpolación empleando el método de Polígonos de Thiessen, al representar un método apropiado para la variable que se quiere medir, debido a que genera un área de influencia para las estaciones meteorológicas, permitiendo definir un comportamiento de la precipitación en la extensión del área del proyecto. En la Tabla 12 se exponen las estaciones cercanas al área del proyecto, que fueron empleadas para generar una interpolación.

Tabla 12 Estaciones meteorológicas definidas para generar la interpolación.

| Código | Nombre estación | Categoría | Estado | Altitud | Precipitación Anual |
|----------|------------------------------|-----------|--------|---------|---------------------|
| 14010020 | Hibacharo [14010020] | PM | ACT | 80 | 1077 |
| 14010090 | Porvenir El [14010090] | PM | ACT | 40 | 1185 |
| 14015010 | Galerazamba [14015010] | CP | ACT | 20 | 845 |
| 14010010 | Piojo [14010010] | PG | ACT | 320 | 1157 |
| 29030140 | San Jose [29030140] | PM | ACT | 20 | 1180 |
| 29030640 | Cabecera Henequen [29030640] | PM | SUS | 9 | 922 |
| 29035070 | Repelon [29035070] | CP | ACT | 10 | 845 |
| 29040020 | Montebello [29040020] | PM | ACT | 100 | 979 |
| 29040190 | Sabanalarga [29040190] | PM | ACT | 100 | 1093 |
| 29040240 | Usiacuri [29040240] | PG | ACT | 100 | 1011 |
| 29040290 | Campanos Los [29040290] | PM | ACT | 100 | 1332 |
| 29030410 | Casa De Bombas [29030410] | PM | ACT | 10 | 791 |

Fuente: IDEAM, 2021.

La clasificación se define de acuerdo con los intervalos de precipitación producto de la interpolación, entendiendo que, a mayor precipitación en un área definida, menor susceptibilidad a la manifestación de incendios forestales. En toda la extensión del área de estudio se evidencia un comportamiento dentro del rango de los 1094 a 1185 mm/año.

Tabla 13 Calificación de precipitación en el área de interés

| PRECIPITACIÓN (mm/AÑO) | VALOR |
|------------------------|-------|
| 1186 – 1332 | 1 |
| 1094 – 1185 | 2 |
| 1012 – 1093 | 3 |
| 846 - 1011 | 4 |
| 791 - 845 | 5 |

Teniendo en cuenta que la susceptibilidad de la vegetación se ve afectada por factores externos de tipo climático que están íntimamente ligados a ella, generando variaciones intrínsecas de sus cualidades, principalmente en lo que hace referencia a la humedad contenida en los tejidos vegetales (influida directamente por la precipitación y temperatura ambiental) (IDEAM, 2011), se considera necesario el criterio de temperatura del área de estudio.

Tabla 14 **Calificación de temperatura en el área de interés**

| Temperatura Media Anual (°C) | Valor |
|-------------------------------------|--------------|
| Extremadamente Frío (1.5-6) | 1 |
| Muy Frío (6-12) | 2 |
| Frío (12-18) | 3 |
| Templado (18-24) | 4 |
| Cálido (>24) | 5 |

Fuente: Modificado de (IDEAM, 2011).

La propagación del fuego aumenta con el ángulo que ofrece la superficie, la propagación a favor de la pendiente es rápida y peligrosa. Los incendios no ocurren al azar, sino que son más frecuentes en ciertas posiciones topográficas. Se considera la calificación empleada para la zonificación de remoción en masa (Tabla 6).

1.4. Amenazas operativas

Para la definición de amenazas operativas se toma como referencia los rangos de zona de alto riesgo definidos por (CENAGAS) y descritas en la Tabla 5. Se precisa un buffer basado en cada una de las distancias definidas por el autor para las zonas de alto riesgo (ZAR) y se procede a asignar una calificación de amenaza (4) Alta para todas las amenazas operativas; no se considera el nivel de amenaza (5) debido a los controles de diseño y construcción que deben considerarse para viabilizar la operación del gasoducto.

1.5. Riesgos externos

Considerando que el riesgo de desastre se define como la probabilidad de que, durante un período específico de tiempo, se produzcan alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos generalizados que requieren una respuesta inmediata a la emergencia para satisfacer las necesidades humanas esenciales, y que pueden requerir apoyo externo para la recuperación (UNGRD, 2018).

Se define la vulnerabilidad como la manifestación de ocurrencia de los eventos amenazantes con base en datos abiertos relacionados con emergencias o desastres presentados en los últimos años en los municipios de Luruaco y Repelón, correspondientes al área de estudio. La Tabla 15 representa la distribución en tres frecuencias para obtener los niveles: alto, medio y bajo de vulnerabilidad, así mismo, la Tabla 16 presenta los eventos registrados en los últimos años.

Tabla 15 Calificación de la vulnerabilidad frente a amenazas naturales

| CANTIDAD DE EVENTOS EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS | VALOR | VULNERABILIDAD |
|---|--------------|-----------------------|
| 1-2 | 1 | Baja |
| 3-4 | 2 | Media |
| 5-6 | 3 | Alta |

Tabla 16 Eventos de desastres naturales en área de estudio

| CANTIDAD DE EVENTOS EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS | AMENAZA | FUENTE |
|---|-------------------|---------------|
| 1 | Remoción en masa | SGC 2014 |
| 1 | Incendio Forestal | UNGRD 2019 |
| 1 | Inundación | UNGRD 2016 |

Finalmente, para evaluar el riesgo se desarrollaron estos tres pasos: la evaluación de la amenaza o peligro; el análisis de la vulnerabilidad y la estimación del riesgo como resultado de relacionar los dos parámetros anteriores. La categorización del riesgo se enmarcó en los niveles de riesgo: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

1.6. Riesgos internos

Una vez definidas las amenazas operativas descritas en el numeral 1.4 Amenazas operativas, se establecen los elementos expuestos a la operación del gasoducto los cuales son: construcciones, drenajes, cuerpos de agua, centros poblados, vías, tuberías de proyectos existentes; para cada uno se define un grado de vulnerabilidad considerando su importancia socio-ambiental y su predisposición a verse afectado negativamente.

La evaluación del riesgo es producto del procesamiento de información, donde se realiza un producto entre el análisis espacial de los elementos vulnerables con las posibles amenazas operativas. La categorización del riesgo se enmarcó en los niveles de riesgo: alto, medio y bajo.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Una vez desarrollados cada uno de los procesos de geoprocesamiento se encontró que, en la zona de estudio, cada una de las amenazas naturales objeto de estudio presentan un comportamiento diferente, sin embargo, de acuerdo con la documentación revisada, en la zona no se han registrado emergencias asociadas a la manifestación de estos eventos amenazantes de manera constante, por lo cual la probabilidad de ocurrencia de los mismos se puede asumir que es baja o que hasta ahora se ha contado con las herramientas que permitan documentar de manera histórica esta información.

Para tener una mayor referencia de la zonificación resultante para cada uno de los riesgos objeto de estudio, se genera un abscisado a lo largo del trazado que permita mayor claridad frente a las longitudes y ubicación del riesgo (Figura 4).

Con la aplicación de la metodología de Saaty se evidencia que, empleando álgebra de mapas y la herramienta *weighted overlay*, la cual se encuentra alineada con la asignación de porcentajes de peso e importancia, se obtienen resultados acordes con las condiciones y las características del área de estudio, donde el criterio del experto o el grupo de expertos que apliquen la metodología, tendrá un alto impacto de los resultados.

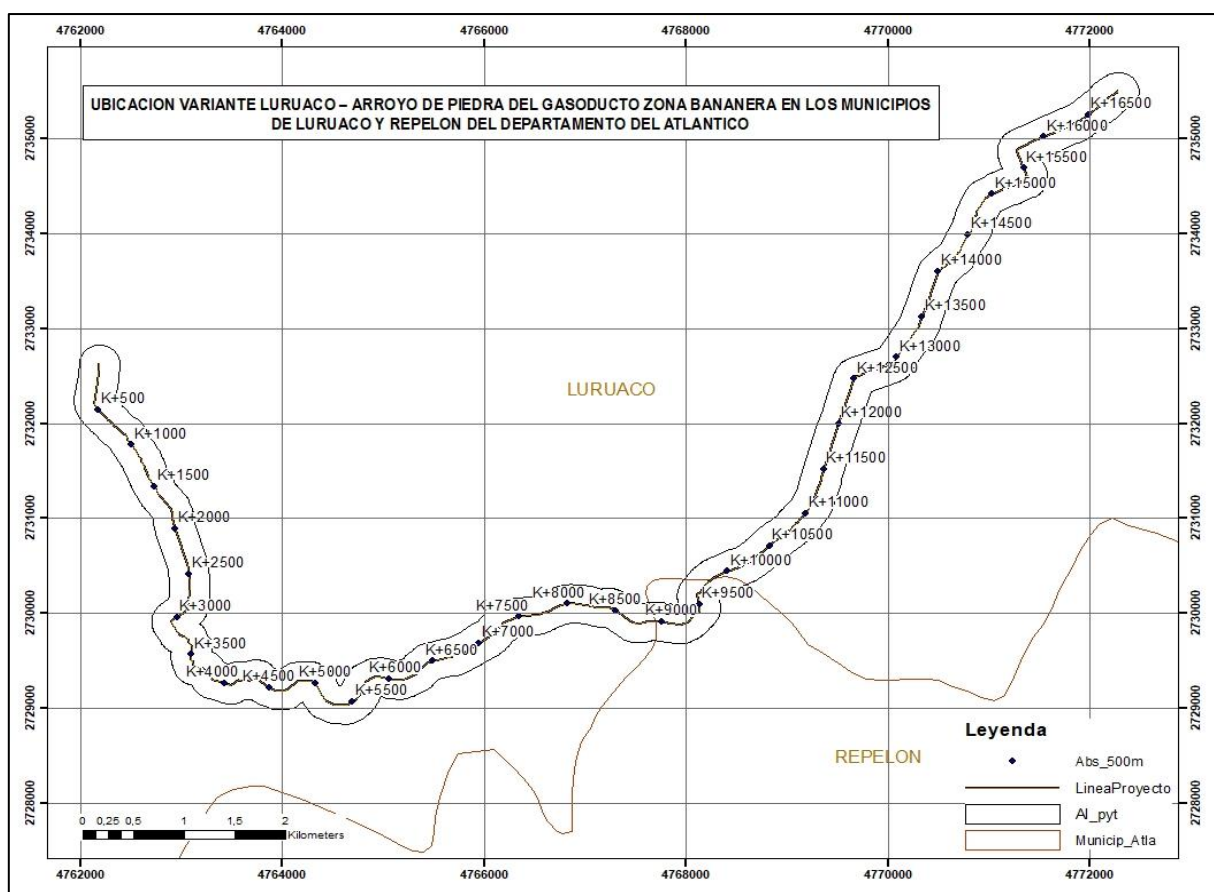


Figura 4 Abscisado del trazado de la Variante Luruaco – Arroyo de Piedra.

A lo largo del trazado de la variante Luruaco – Arroyo de Piedra se obtiene que el riesgo para el ducto, por un fenómeno de remoción en masa, es bajo en su mayor extensión dentro del área de influencia (AI) del proyecto, lo cual se relaciona principalmente con la importancia asignada a la pendiente del terreno, que para el área de interés, se caracteriza por ser plana; otro factor representativo es la estructura geológica, la cual en su mayoría se encuentra representada por rocas cuyas partículas

minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales (Figura 5).

Por el contrario, las zonas donde se presenta un mayor riesgo por remoción en masa se encuentran condicionadas por la presencia de la Falla de Luruaco y la presencia de la serranía del Piojo (Figura 5).

Para el riesgo por el fenómeno por inundación a lo largo del proyecto, se obtuvo que la mayoría del trazado presenta un riesgo medio, lo cual se encuentra influenciado por la curvatura del terreno y la pendiente, ya que se encuentra una zona muy plana con una amplia red hídrica y varios cuerpos de agua colindantes a lo largo del área de influencia del proyecto; dentro de la influencia también se resalta la presencia de depósitos aluviales, los cuales dentro de sus características se resaltan los suelos poco permeables (Figura 6).

El riesgo mayor se presenta a lo largo de las rondas de los drenajes que atraviesan el área de influencia del proyecto, por el contrario, las zonas con menor riesgo están asociadas con zonas de montaña de la serranía del Piojo, donde el flujo del agua estará condicionado por la pendiente (Figura 6).

El riesgo por incendios forestales a lo largo del trazado de la variante y dentro del área de influencia de la misma, se encuentra con mayor nivel entre el K1+300 y el K6+400, relacionado principalmente con los resultados del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en esa región, registrando los valores más cercanos a 1, acorde con la presencia de coberturas con un estado fotosintético activo en la serranía del Piojo y vegetación alrededor de la Ciénaga de Luruaco en densidad y buen estado (Figura 7).

La presencia de vegetación intensifica la propagación de los incendios forestales, por lo cual, donde se presente mayor densidad de coberturas naturales, el riesgo será más alto, evidenciando coherencia con la zonificación resultante. La pendiente por su parte, también representa un factor agravante en este resultado (Figura 7).

Los riesgos operativos se definieron de manera independiente ya que su materialización puede desarrollarse bajo condiciones foráneas en cada uno de los casos de estudio. Se consideran los elementos vulnerables frente a la operación del gasoducto, dentro del área de estudio (Figura 8).

El riesgo operativo por la formación de atmósfera explosiva a causa de fuga generada por ruptura en válvula bridada de 6" de la City Gate, se ubica dentro del área exposición para cada uno de los *city gates* (casetas) definidos para la operación de gasoducto. Se genera un riesgo medio, ya que se puede afectar la integridad y características propias de construcciones, drenajes o vías dentro del área de exposición, así como la actividad social y ambiental dentro de estos elementos (Figura 9).

El riesgo operativo por la fuga y explosión por orificio correspondiente al 20% del diámetro nominal del ducto, tiene un mayor nivel en zonas donde el trazado se encuentra cercano a construcciones; el riesgo disminuye cuando el trazado está cercano a drenajes o cuerpos de agua, considerando la capacidad del agua para

neutralizar el fuego, por último, se presenta un riesgo bajo para elementos como lo jagüeyes y construcciones de usos complementarios (Figura 10).

El riesgo operativo por Jet Fire de fuga por orificio correspondiente al 20% del diámetro nominal del ducto, tiene el menor desenvolvimiento en términos de riesgo, ya que la amenaza operativa alcanzará su máxima extensión en los (16) metros próximos al trazado, por lo cual su zonificación se encuentra relacionada con la proximidad a los diferentes elementos vulnerables.

La escala de zonificación definida para este estudio no es la apropiada para apreciar el riesgo por esta amenaza operativa, limitado por la corta distancia entre el trazado y el área de exposición; sin embargo el resultado permite definir claramente los puntos críticos a lo largo del trazado, en los cuales se localiza este riesgo (Figura 11).

Como resultado de la zonificación de riesgo externos (riesgos por amenazas naturales) y riesgos internos (riesgos por amenazas operativas) se puede establecer que los criterios constructivos y de diseño del proyecto deberán considerar la cercanía del trazado con la red hídrica y la red vial, ya que el trazado es interceptado en varios tramos, de la misma manera se debe considerar la presencia de construcciones dentro del área de influencia del gasoducto.

Dentro de las amenazas operativas, se consideraron aquellas encontradas en documentación secundaria, sin embargo, en la identificación de riesgos internos se deben contemplar los criterios de diseño del proyecto, por lo cual esto debe contemplarse como un insumo previo a la definición de las amenazas y riesgos.

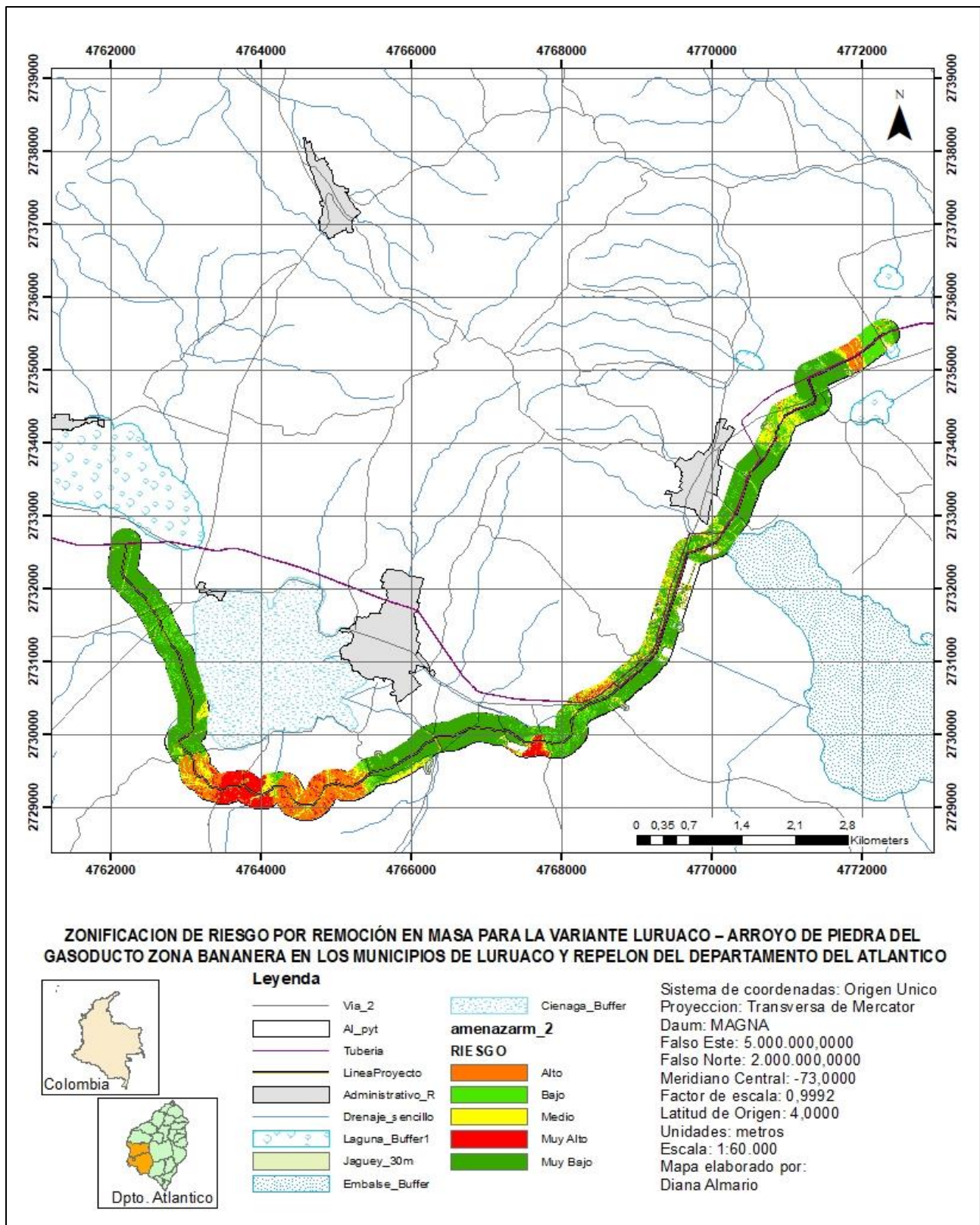


Figura 5 Zonificación de riesgo por remoción en masa.

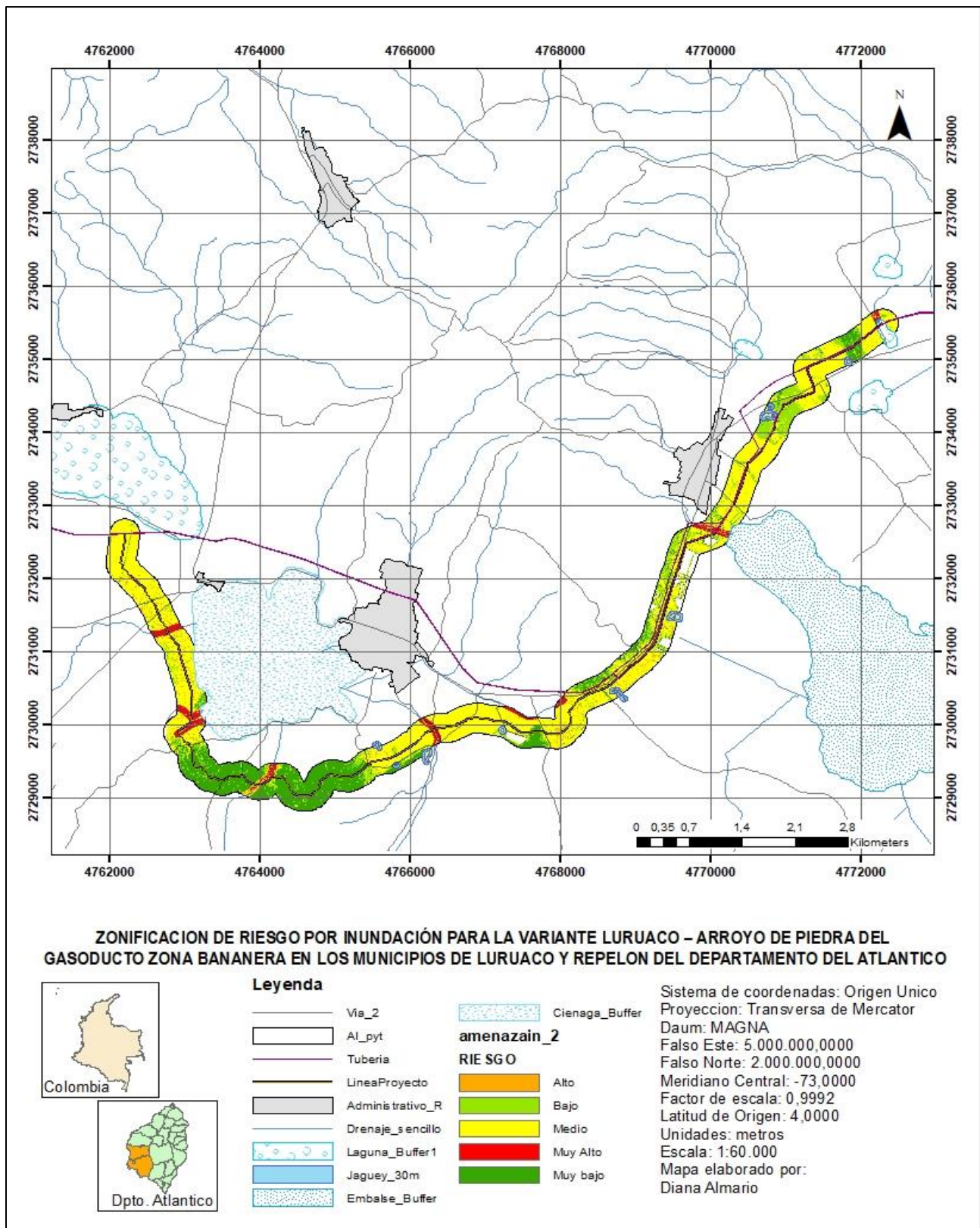


Figura 6 Zonificación de riesgo por inundación.

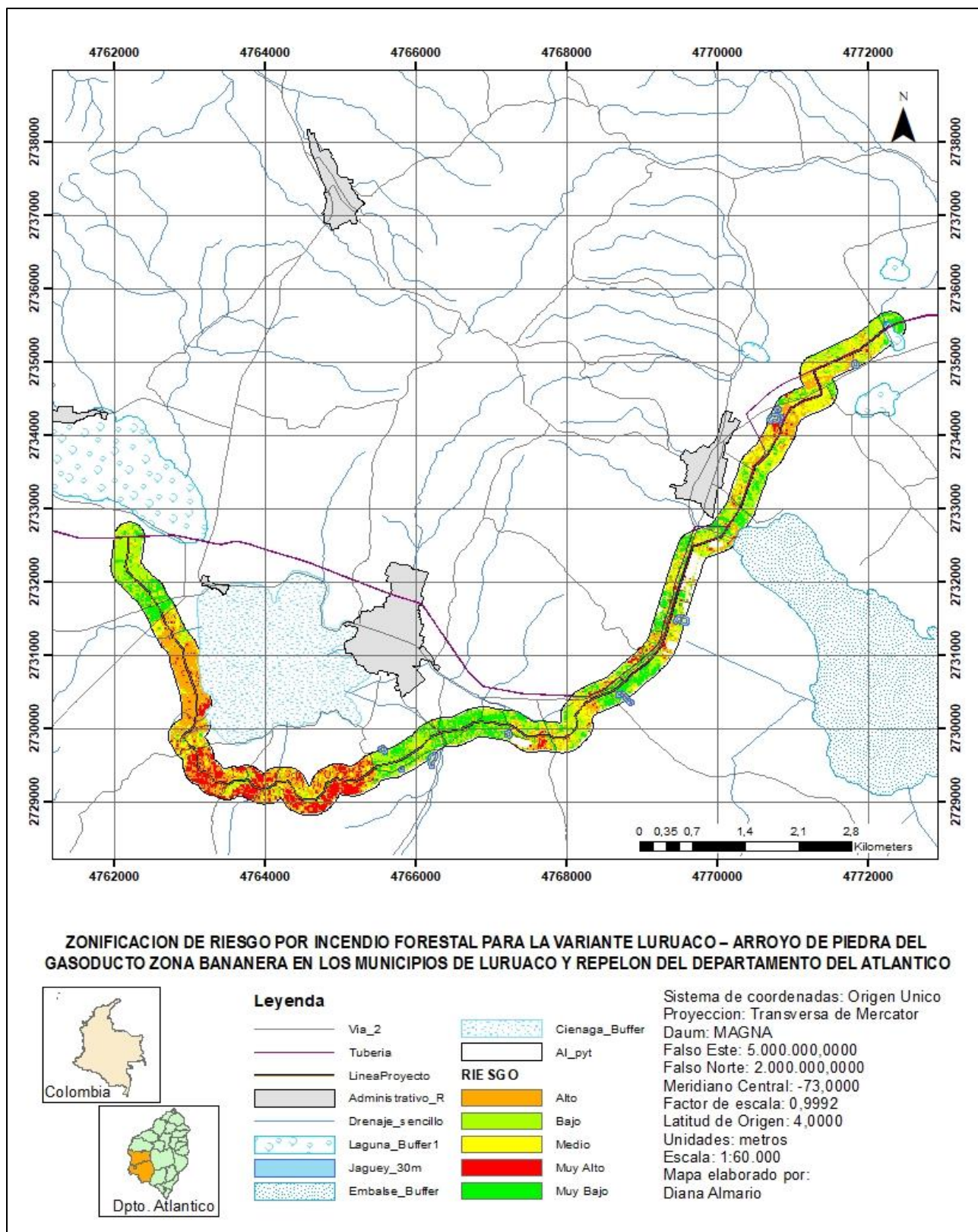


Figura 7 Zonificación de riesgo por incendio forestal.

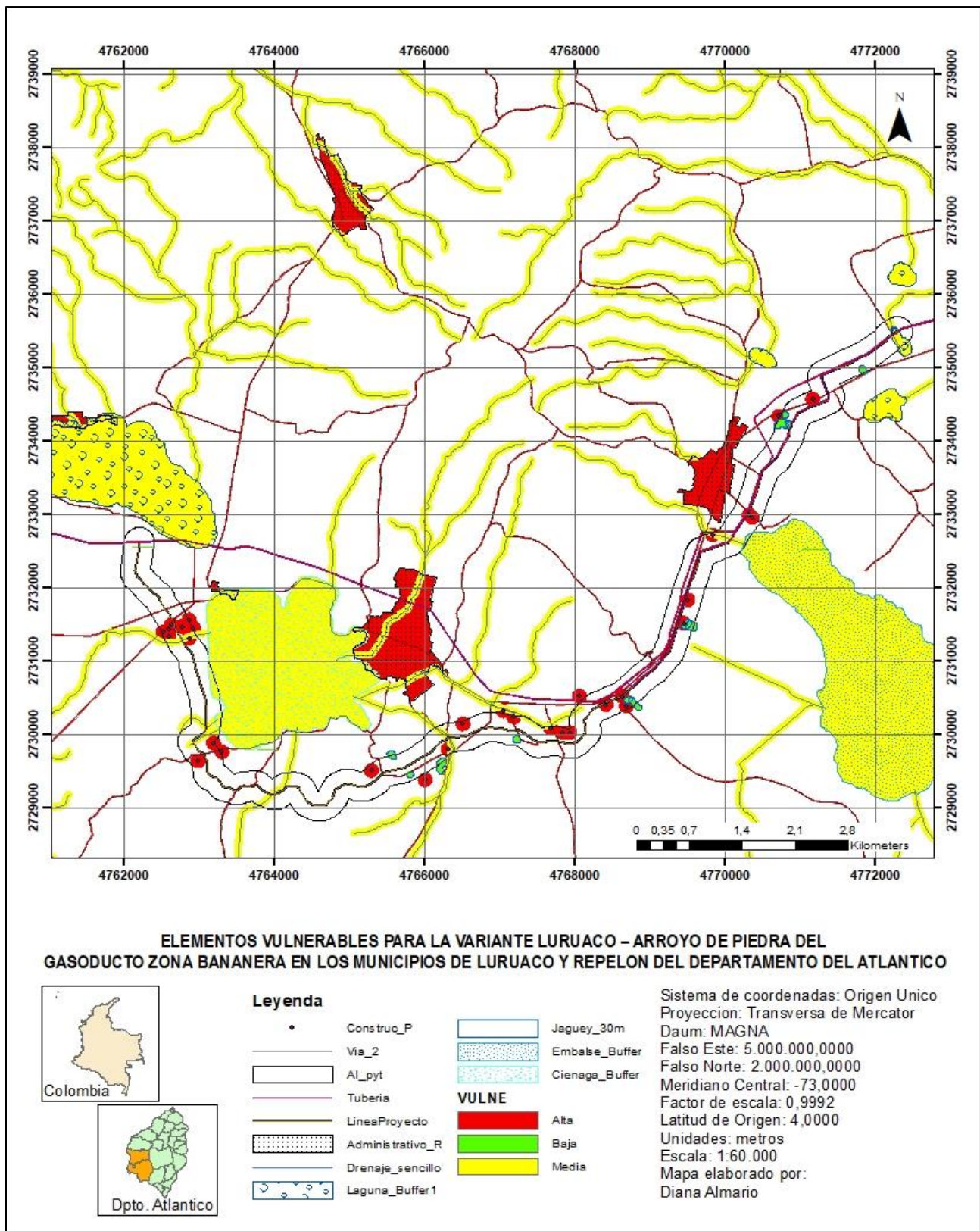


Figura 8 Elementos vulnerables para la operación del gasoducto.

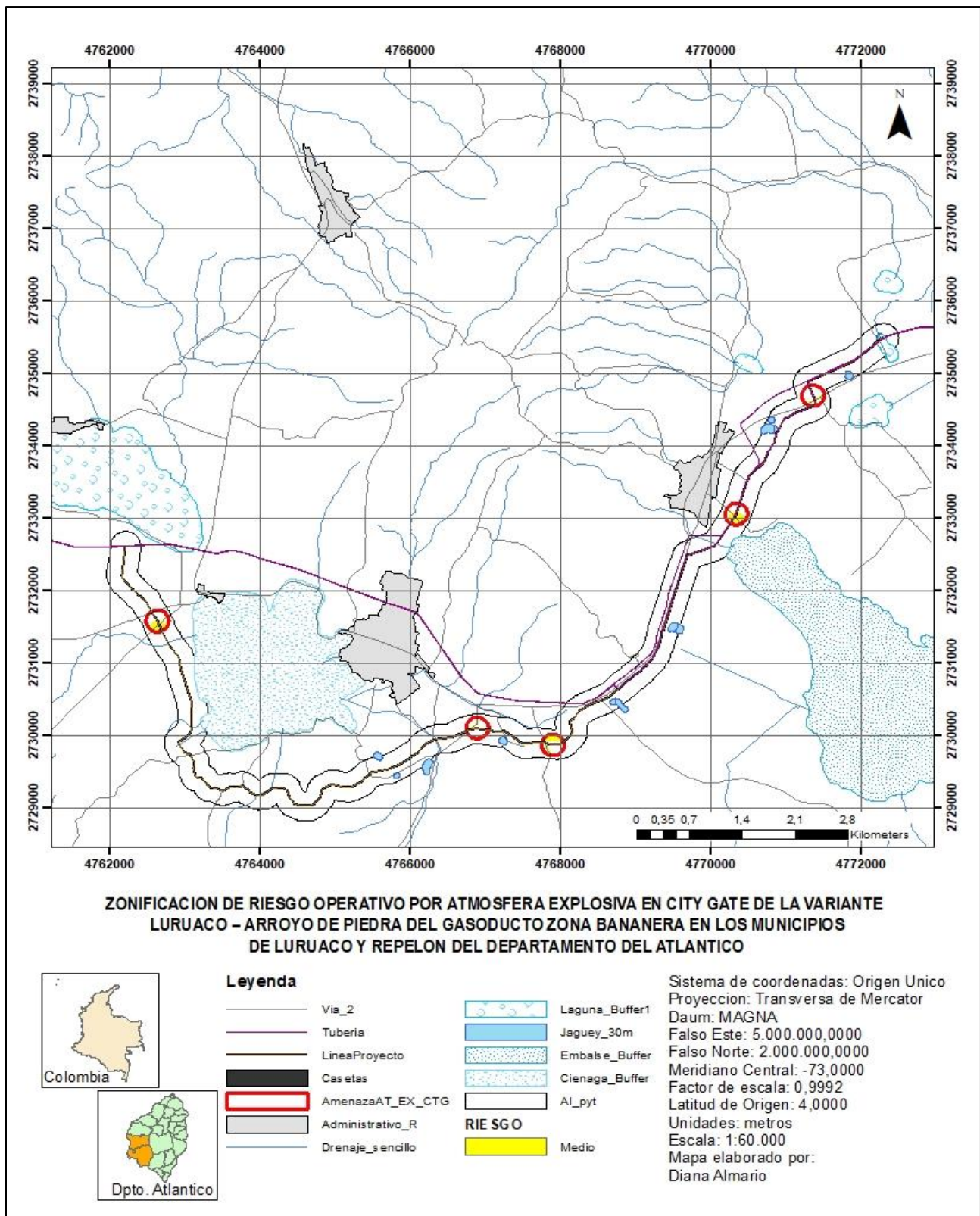


Figura 9 Zonificación riesgo operativo - atmosfera explosiva en city gates.

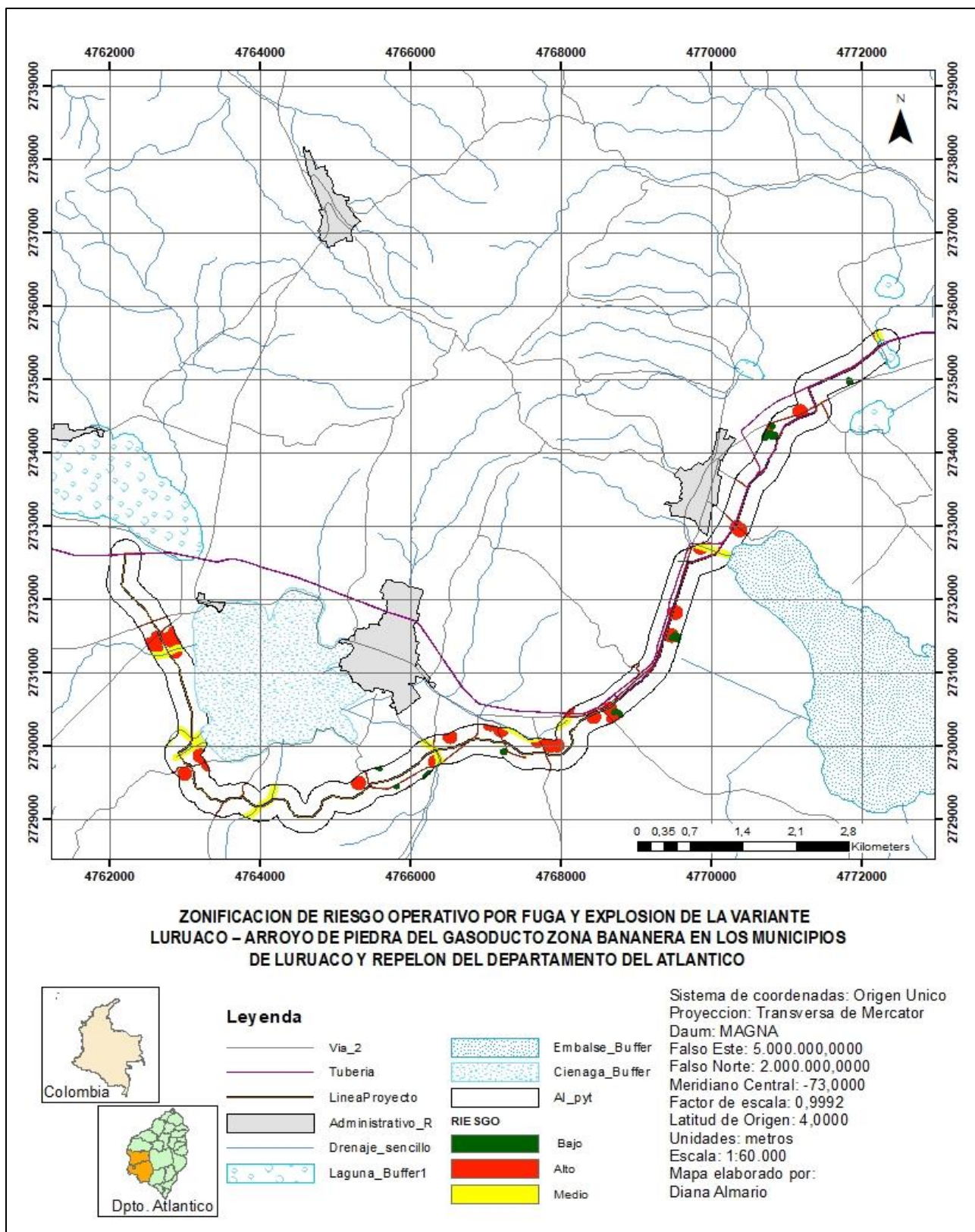


Figura 10 Zonificación de riesgo operativo por fuga y explosión.

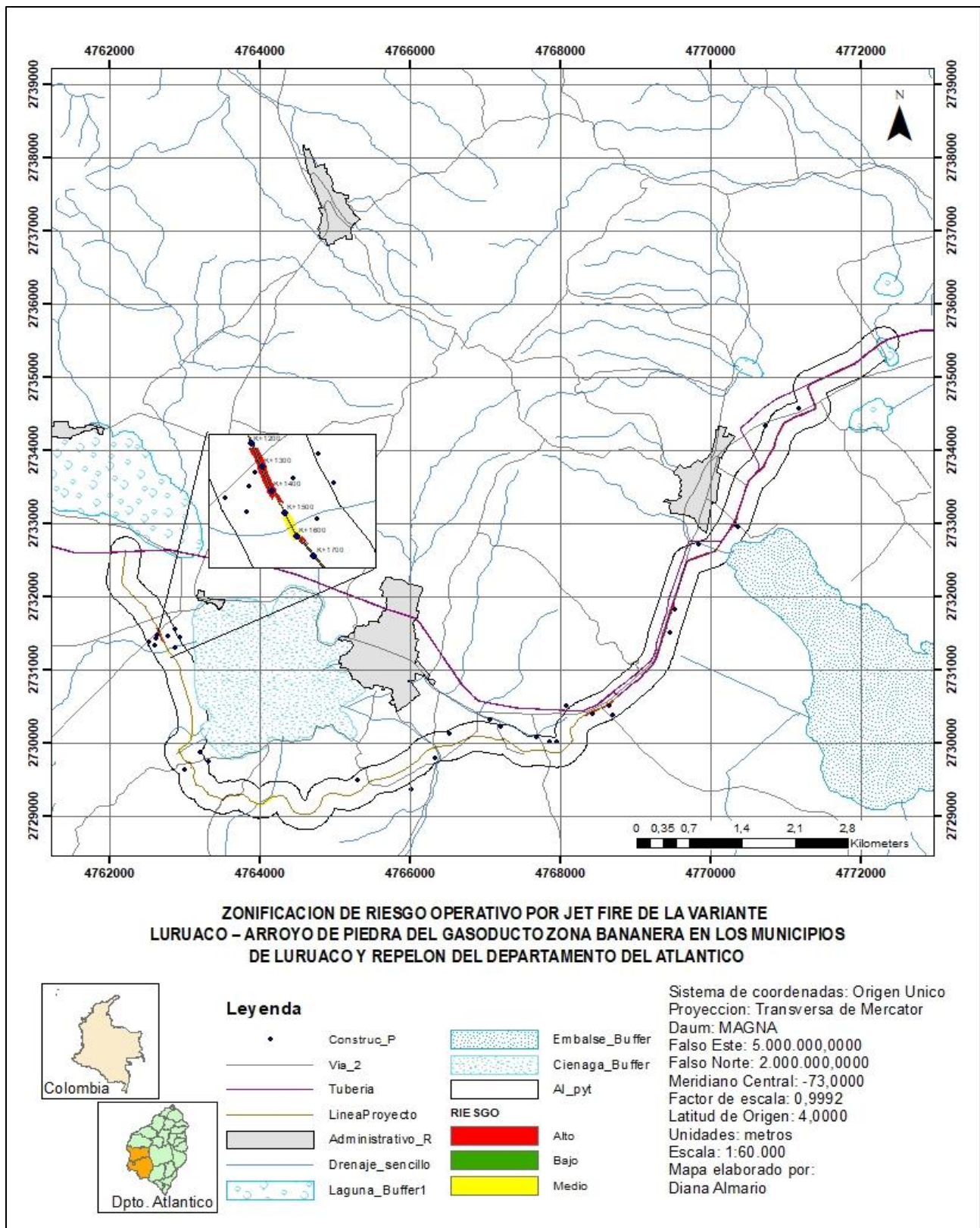


Figura 11 Zonificación de riesgo operativo por Jet Fire

3. CONCLUSIONES

- La combinación de los SIG con metodologías multicriterio evidencian ser una integración sencilla y óptima que puede emplearse como herramienta en la toma de decisiones en diversos proyectos, al permitir el uso y la composición de una variedad considerable de información geográfica y técnica, que para el caso de estudio fue enfocada a riesgos.
- La aplicación de la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) para la jerarquización de cada uno de los criterios que fueron considerados dentro de la definición de amenazas naturales permitió integrar una cantidad de datos heterogéneos que, al ponderarse y evaluarse, tomado como referencia la experticia del profesional y su conocimiento del área de estudio, representaron un comportamiento coherente y una zonificación cercana a la realidad, de las amenazas naturales para el área de estudio.
- Se resalta que la aplicación de esta metodología AHP demanda una buena elección de evaluadores que definan las características de las alternativas, criterios y subcriterios para realizar la evaluación con el objeto de reducir la posible carga de subjetividad de los criterios de evaluación.
- Dentro del desarrollo metodológico, se evidencio que para las amenazas internas (amenazas operativas) no era aplicable emplear la metodología AHP ya que estas amenazas se pueden manifestar de manera independiente una de la otra, por lo cual no hay criterios condicionantes relacionables. Para la definición de vulnerabilidad tampoco se aplicó esta metodología.
- Dentro de los mapas resultantes, derivados de las metodologías empleadas, se puede distinguir claramente los eventos amenazantes internos y externos debido a sus características ambientales, geofísicas y climáticas, ya que permite una visión amplia y panorámica de las posibilidades de su espacialización.
- Dentro del proceso de la valoración y evaluación del riesgo fue fundamental definir la vulnerabilidad del medio hacia el proyecto y del proyecto hacia el medio, de manera que se logró la zonificación integral de los riesgos de la variante proyectada.
- Partiendo de los resultados, se puede establecer que la zonificación de riesgos representa un factor o criterio importante que puede emplearse dentro de la definición del diseño y demás elementos de instrumentación o medidas que minimicen el riesgo en los puntos críticos.
- Se aclara que este estudio solo consideró algunas variables que el profesional asume como relevantes para el área de estudio y basado en la información de entrada, sin embargo, se aclara que mayor cantidad y calidad de información permitirá una definición de riesgos más precisa.

- Se aclara que las amenazas operativas se enmarcan en un estudio con características de diseño similares a las de la variante proyectada, sin embargo, las amenazas operativas deben basarse en modelos predictivos de software especializado que determine las zonas de riesgo para cada proyecto específico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, M., ARQUERO, A., & MARTÍNEZ, E. (2000). *EMPLEO DEL AHP (PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO) INCORPORADO EN SIG PARA DEFINIR EL EMPLAZAMIENTO ÓPTIMO DE EQUIPAMIENTOS UNIVERSITARIOS. APLICACIÓN A UNA BIBLIOTECA*. Madrid.
- Banco Mundial . (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. Bogotá.
- Barrientos, M., & Valderrama, Y. (2020). *MODELO SIG DE RIESGOS HIDROLÓGICOS Y GEOLÓGICOS EN EL SISTEMA TRONCAL DE TRANSPORTE DE GAS DE ANTIOQUIA* . Medellín.
- Becerra, M., & Rodriguez, R. (2017). Seleccin de Alternativas para el Suministro de Gas Natural en Colombia empleando el Proceso Analitico Jerarquico. *Revista Ingenieria*, 190-210.
- Bosque, J., Díaz, C., Díaz, M., Gomez, M., Gonzalez, D., Rodriguez, V., & Salado, M. (2004). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CARACTERIZAR LAS ÁREAS EXPUESTAS A RIESGOS TECNOLÓGICOS MEDIANTE SIG APLICACIÓN EN LA COMUNIDAD DE MADRID. *GeoFocus*, 44-78.
- CENAGAS. (s.f.). *ESTUDIO DE RIESGO AMBIENTAL NIVEL 0. DUCTOS TERRESTRES*. México.
- CORNARE. (2012). *EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE RIESGOS POR AVENIDA TORRENCIAL, INUNDACIÓN Y MOVIMIENTO EN MASA Y DIMENSIONAMIENTO DE PROCESOS EROSIVOS EN EL MUNICIPIO DEL SANTUARIO* . Antioquia.
- Delvasto, G. (2017). *MODELO PARA LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE GASODUCTOS DE TRANSPORTE DE GAS NATURAL EN COLOMBIA*. Bogotá: UNIVERSIDAD EAN.
- IDEAM. (2011). *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal*. Bogotá.

MAVDT. (2010). *Decreto 2028*. Bogotá.

Niemeyer, H. (1999). *APUNTES DE GEOLOGIA ESTRUCTURAL*. Antofagasta .

Sarmiento, P. (2017). *DESARROLLO Y ANALISIS DE ZONIFICACION DE AMENAZA POR FENOMENOS DE REMOCION EN MASA: USO Y EVALUACION DEL METODO HEURISTICO DEL PROCESO DE ANALISIS JERARQUICO Y COMPARACION DE CRITERIOS ADECUADOS*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). *DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000* . Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1: 25.000*. Bogotá.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga.

UNGRD. (2018). *Metodologías para evaluar la amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo por ciclones tropicales* . Bogotá.